

Resolución Espacial

PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 10

Profesora María Cinta Puell
Grado Óptica y Optometría



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID

Índice

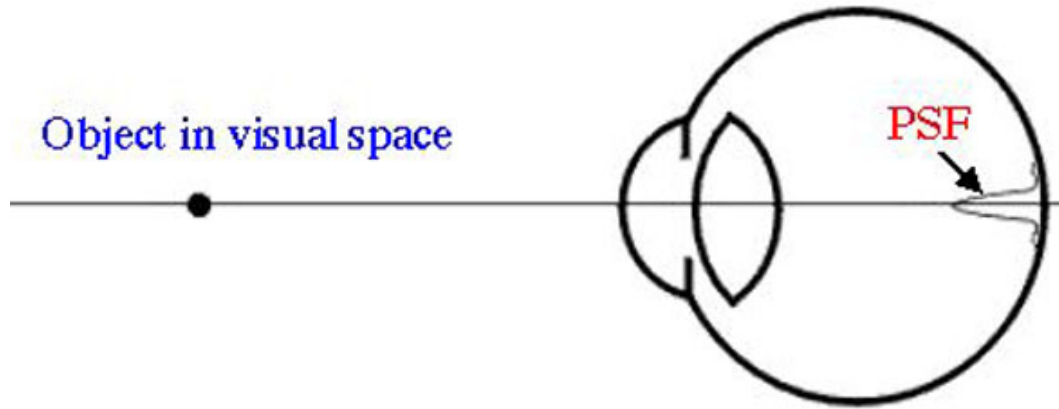
- Introducción
 - Distribución de la luz en la imagen retiniana: PSF
- Definiciones y especificaciones de agudeza:
 - Mínimo visible
 - Mínimo resoluble
 - Mínimo reconocible
 - Mínimo espacial discriminable o hiperagudeza
- Factores que limitan la agudeza visual
 - Sistema óptico ocular
 - Factores anatómicos y fisiológicos
 - Luminancia y contraste del estímulo

Introducción: agudeza visual

- Capacidad del sistema visual para detectar, reconocer o resolver detalles espaciales mínimos.
- Umbral de resolución espacial:
 - Mínimo ángulo de resolución
- La resolución espacial o agudeza visual depende o está limitada por:
 - La calidad óptica de la imagen formada en retina
 - La anatomía y fisiología del sistema visual
 - Otros factores: luminancia, contraste, tipo de estímulos, criterios y escalas de medida.

Introduction

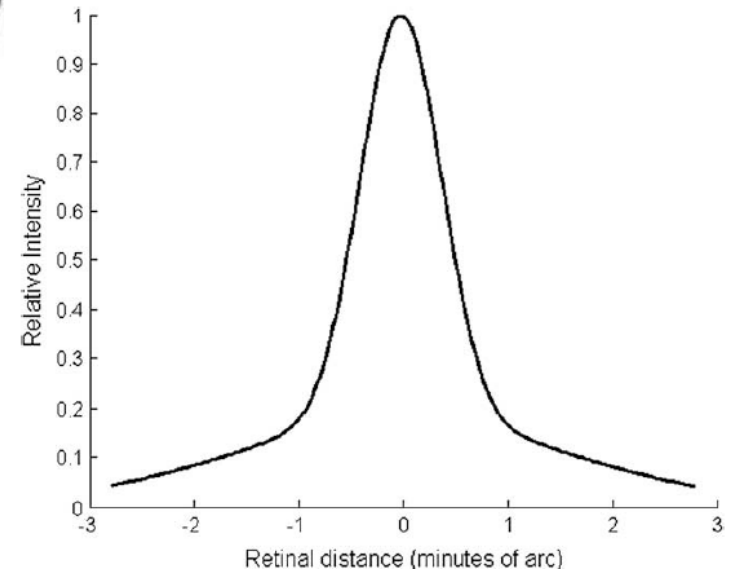
Distribución de la luz en la imagen de un punto (PSF)



La **PSF** describe la distribución de luz sobre la retina de una fuente puntual en el espacio visual

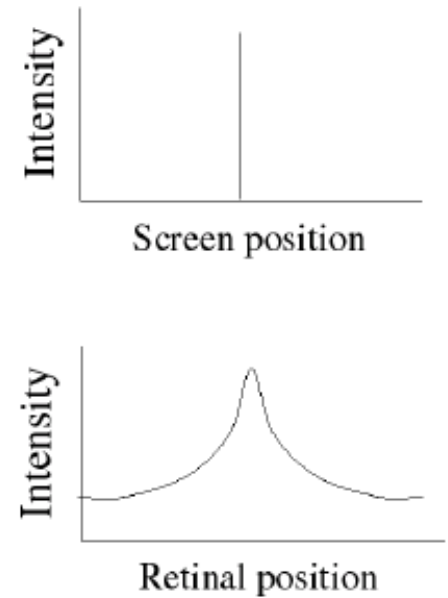
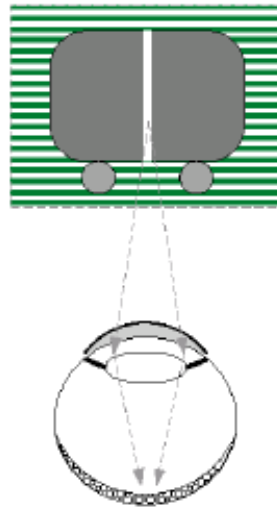
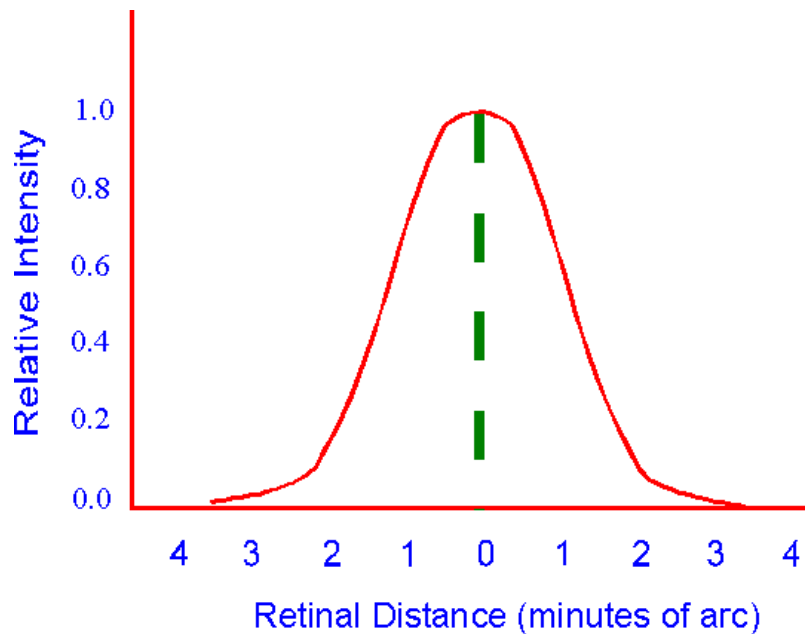
Es el perfil de luminancia o intensidad a través de la imagen de un punto

La imagen de un punto es un círculo de difusión de luz



PSF de un ojo normal (incluyendo aberraciones y dispersión del ojo)

PSF



El máximo de intensidad en la PSF es proporcional a la luminancia del punto o línea objeto.

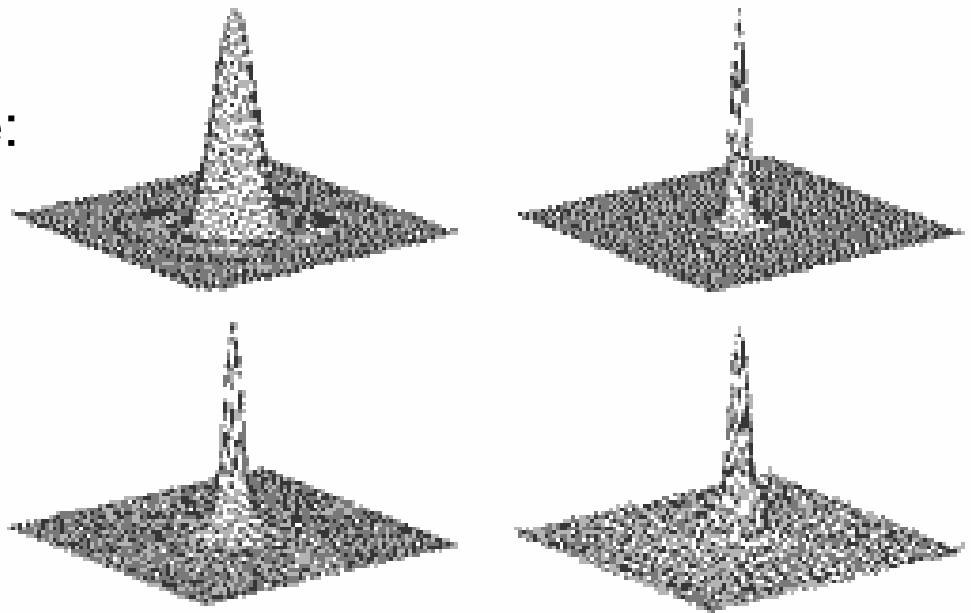
La extensión o anchura de la PSF define la calidad óptica del ojo.

PSF y calidad óptica de la imagen

El ancho del PSF afecta al contraste de la imagen y, por lo tanto a la agudeza visual

El ancho del PSF depende de:

- Difracción
- Aberraciones
- Desenfoco
- Dispersión



Una mayor anchura de la PSF disminuye el contraste de la imagen y por lo tanto la agudeza visual

PSF y formación de la imagen óptica

Objeto:

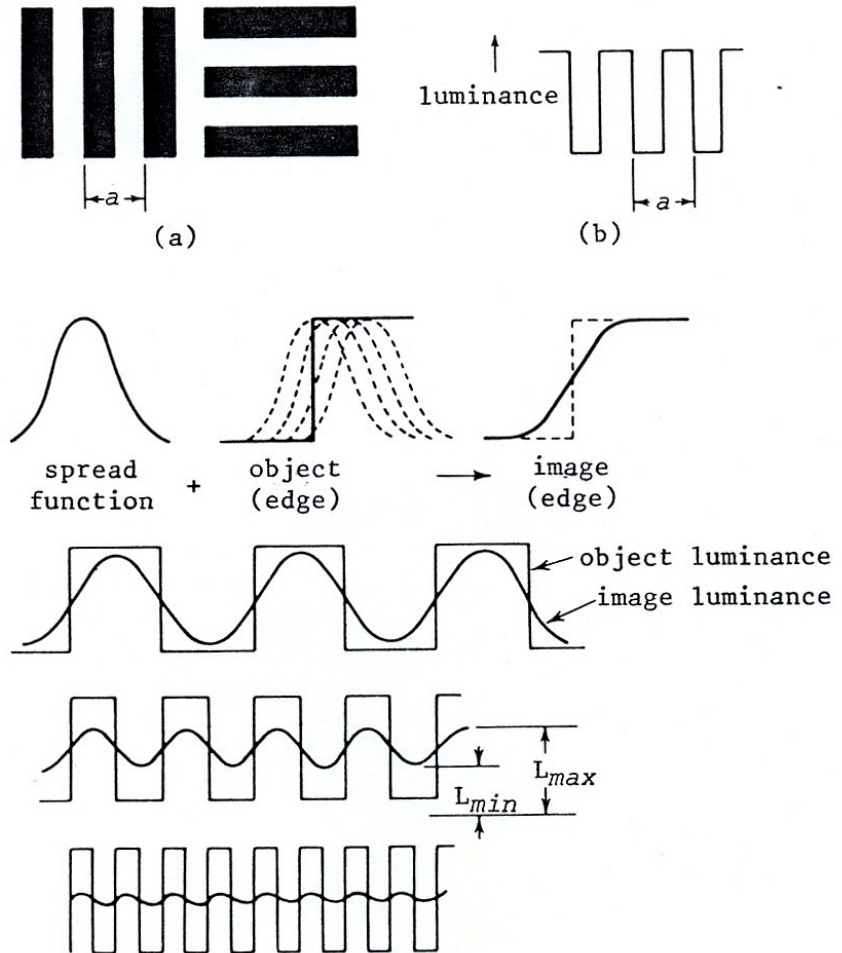
Conjunto de fuentes puntuales

Imagen:

Convolución (suma) de cada una de las PSFs

Los bordes bien definidos de la rejilla objeto se vuelven menos definidos en la imagen óptica de la rejilla.

El procesamiento neuronal mejora la imagen percibida.



Definiciones y especificaciones de agudeza

- **AV mínimo visible**

- ❑ Detección de una característica
- ❑ 0,5 - 1 segundo de arco

- **AV mínimo resoluble**

- ❑ Resolución de dos características (2 puntos o 2 líneas)
- ❑ 30'' - 1 minuto de arco

- **AV mínimo reconocible**

- ❑ Identificación de una característica (optotipos, letras)
- ❑ 30'' - 1 minuto de arco

- **Mínimo espacial discriminable o hiperagudeza**

- ❑ Discriminación de un cambio en una característica (cambio de tamaño, posición u orientación)
- ❑ 3 segundos de arco

AV Mínimo Visible

El objetivo más pequeño que se puede detectar

La detección de objetivos solo requiere la percepción de la presencia o ausencia de un aspecto de los estímulos, no la discriminación del detalle del objetivo



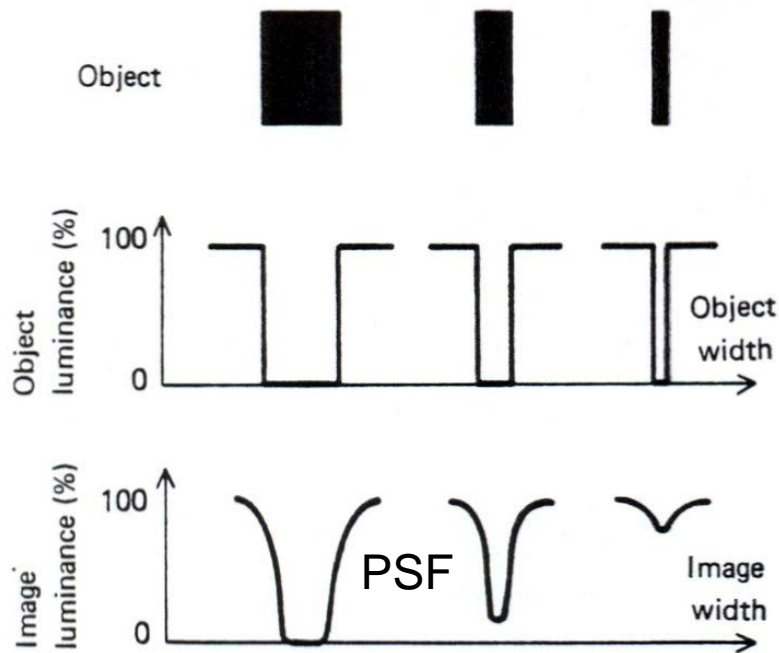
Tarea de detección: decir si un punto o una línea están presentes

La agudeza del mínimo visible se especifica en términos del **tamaño angular** en la retina del objeto más pequeño detectado

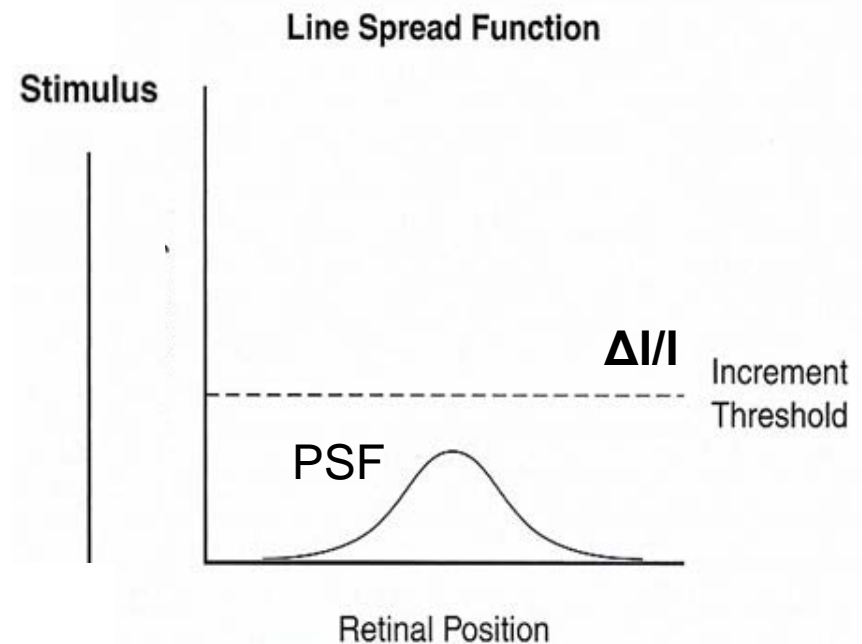
Límite de 0,5" para un cable oscuro contra un fondo muy brillante

Está limitada por nuestra capacidad para discriminar la intensidad del objetivo en relación con su fondo (**tarea de umbral de incremento ΔI**)

AV Mínimo Visible



La línea se vuelve cada vez más delgada, hasta que deja de ser visible.



La altura de PSF disminuye a medida que la línea se vuelve más delgada.

El factor limitante es la sensibilidad del observador a pequeñas variaciones en la intensidad del estímulo (**fracción de Weber $\Delta I/I$**), es decir, su **sensibilidad al contraste**.

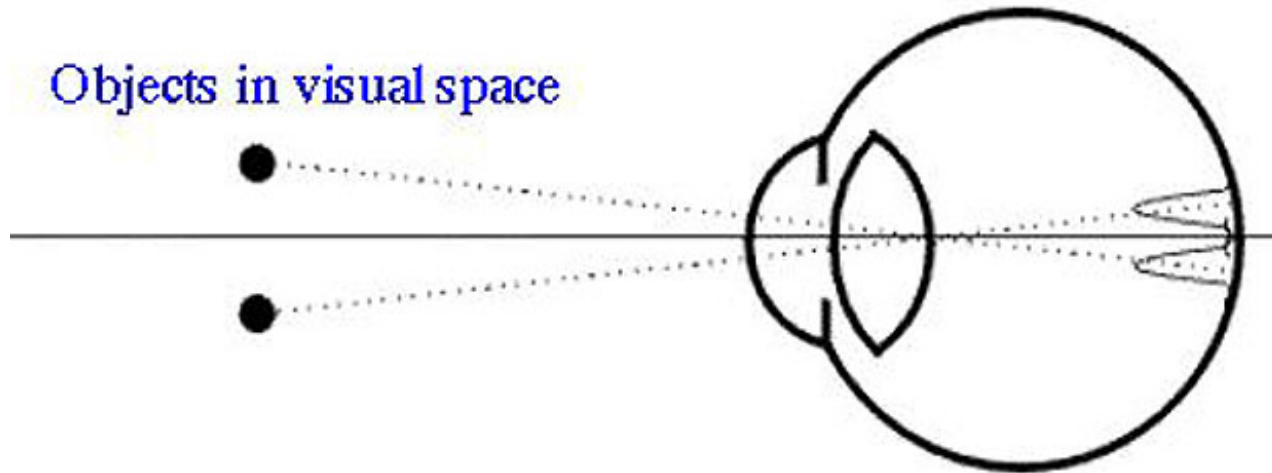
Detección o mínimo visible

CRITERIO	MÍNIMO VISIBLE
Tarea	Detectar la presencia o ausencia de un estímulo visual
Pregunta psicofísica típica de elección forzada	¿Hay una línea en el campo? ¿Era horizontal o vertical?
Base fisiológica	Umbral de luminancia diferencial
Métodos de medida	Variar el tamaño del objeto (Modificar el contraste del estímulo)
Magnitud del mejor umbral	aprox 1 segundo de arco Valor más pequeño que el diámetro de un cono.
Efecto de la degradación de la imagen	Moderado

AV Mínimo resoluble

Separación angular más pequeña que se puede resolver entre 2 objetos próximos.

Resolucion de dos puntos o de dos líneas; también “**Minimum Separable**”



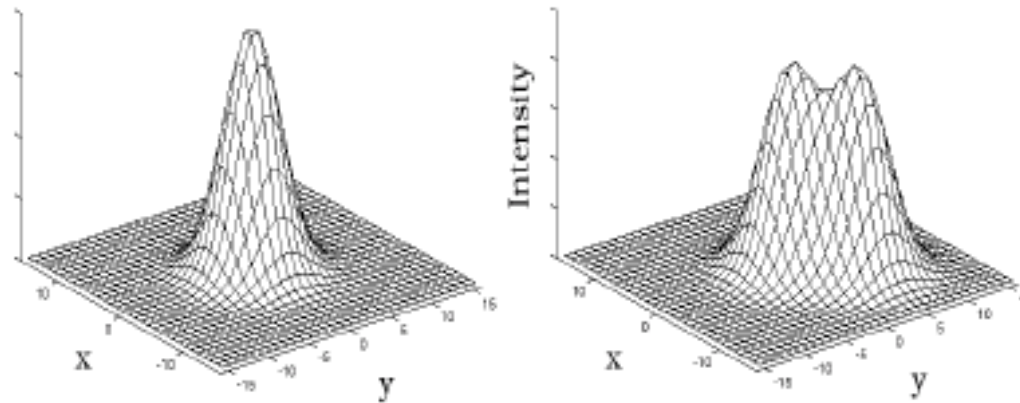
Cada punto forma una imagen en retina según la PSF

El grado de superposición de las dos PSFs dependerá de la separación de los puntos

AV Mínimo resoluble

Calidad óptica del ojo

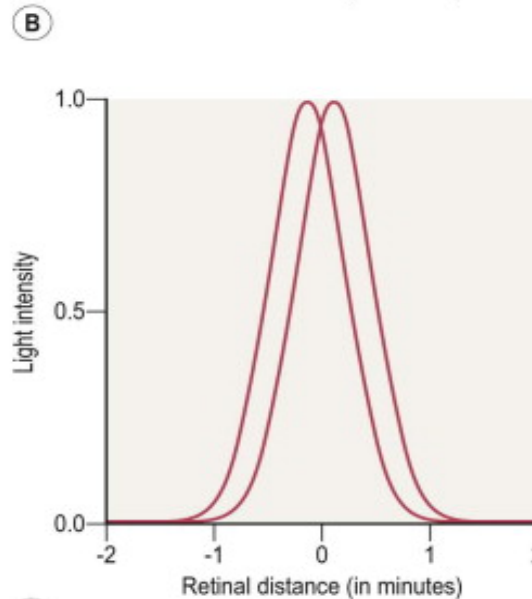
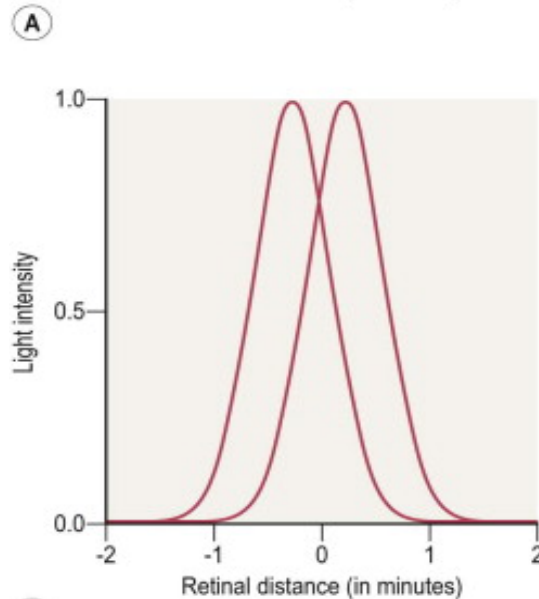
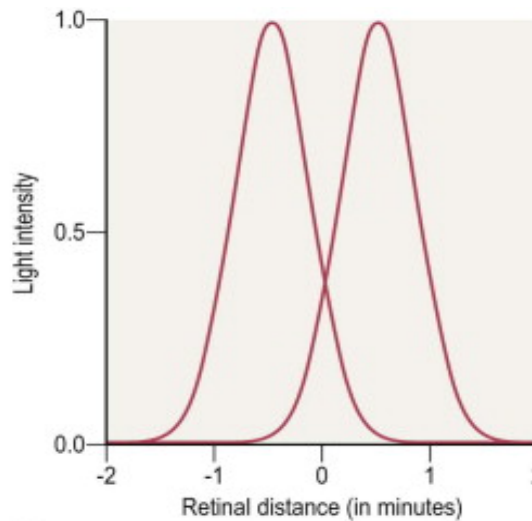
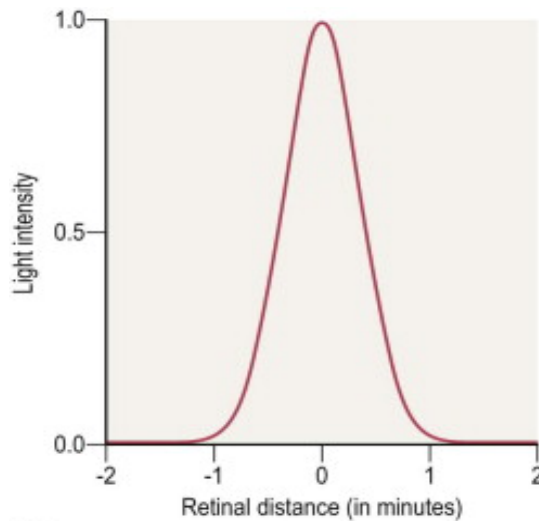
Retinal Image



Monitor Image



AV Mínimo resoluble



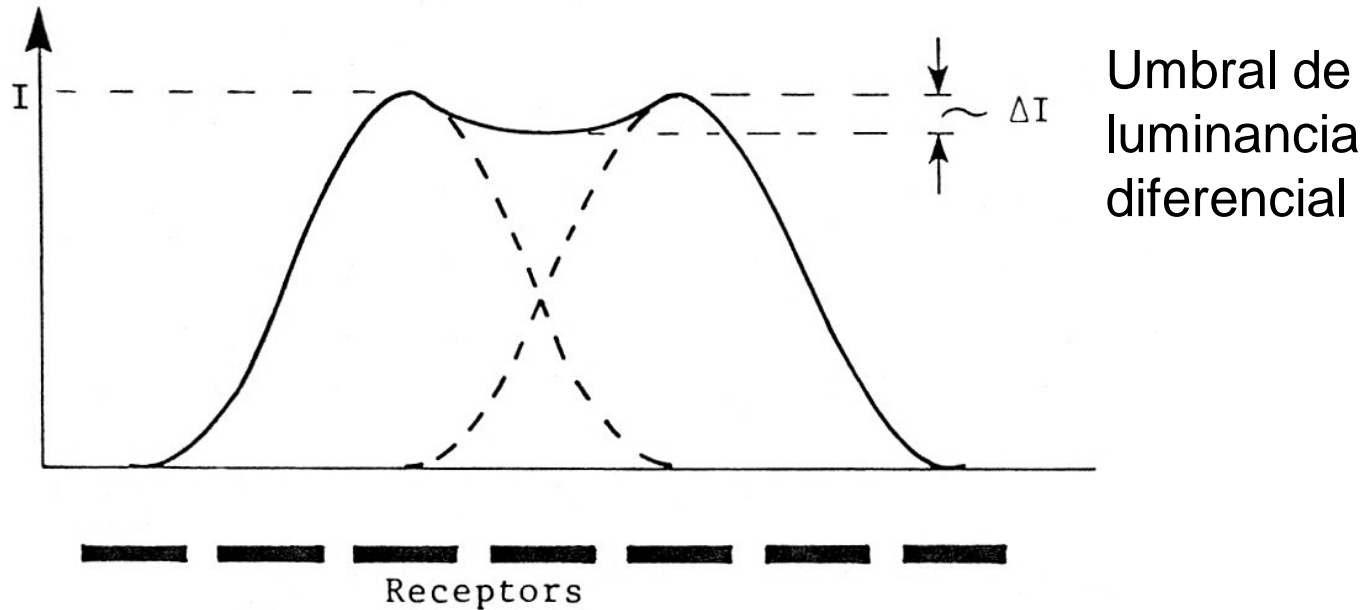
Calidad óptica del ojo

(A) Imagen retiniana de un solo punto.

(B–D) Imagen retiniana de un par de puntos cercanos, separados por diferentes distancias

AV Mínimo resoluble

Resolucion de dos puntos o de dos líneas



- 1- Los valores de I máx de las PSF deben estar separados
- 2- Se debe superar el umbral de luminancia diferencial (ΔI) relacionado con la luminancia de fondo (fracción de weber $\Delta I/I$)
- 3- Los máx y la zona de separación deben estimular **diferentes fotorreceptores**

AV Mínimo resoluble

Método de medida: variar la separación espacial entre los componentes del objeto.

Patrón de estímulo: un par de puntos, una rejilla o un tablero de ajedrez.



En la visión foveal, el límite se determina principalmente por el **espaciamiento de los fotorreceptores** (muestreo por fotorreceptor)

Límite de aproximadamente 1 min arco - 30 seg arco

AV mínimo reconocible

El **tamaño angular** de la **característica más pequeña** que se puede **reconocer o identificar**.

Tamaño del objeto superior al umbral de detección

Medida utilizando optotipos (AV de letras).



Mínimo Ángulo de Resolución (MAR) = 1'
Agudeza visual decimal = $1 / u$
Agudeza visual LogMAR = 0

Mínimo resoluble y reconocible

CRITERIO	MÍNIMO RESOLUBLE y RECONOCIBLE (agudeza visual común)
Tarea	Detectar la presencia de un aspecto identificador en un estímulo visible o distinguir entre más de uno.
Pregunta psicofísica típica de elección forzada	¿Es una c o una o? ¿La apertura de la c está hacia arriba;....?
Base fisiológica	Detección de las diferencias de claridad entre varias áreas adyacentes
Métodos de medición	Variar el tamaño del objeto o la distancia espacial entre componentes del objeto
Magnitud del mejor umbral	Aprox 30" de arco. Hay concordancia con la capacidad de resolución esperada de la óptica del ojo.
Efecto de la degradación de la imagen	Serio

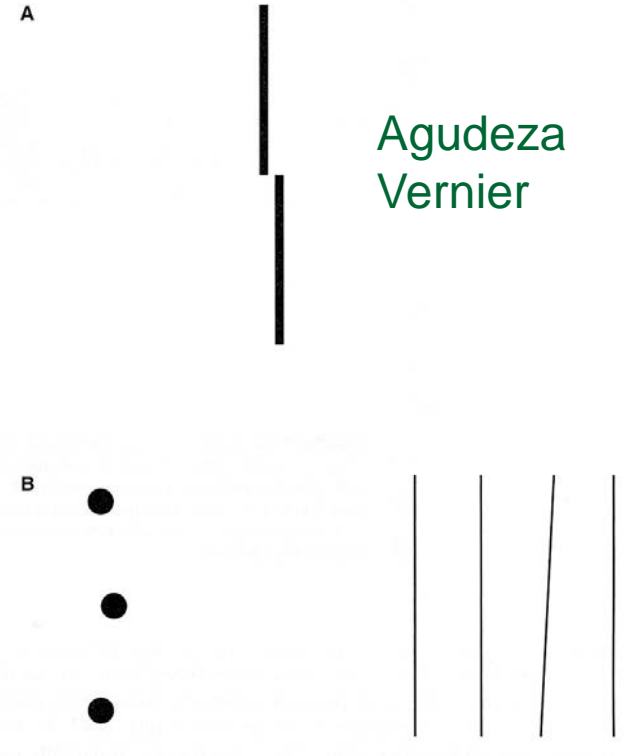
Mínimo espacial discriminable o hiperagudeza

Tamaño angular del cambio más pequeño que se puede **discriminar** en una **característica** (p.e. un cambio en el tamaño, la posición o la orientación)

La tarea consiste en juzgar la posición relativa de los objetos.

Los juicios se pueden hacer con una resolución superior al tamaño o el espaciado de los conos foveales.

Límite de hiperagudeza
aprox 3 segundos de arco

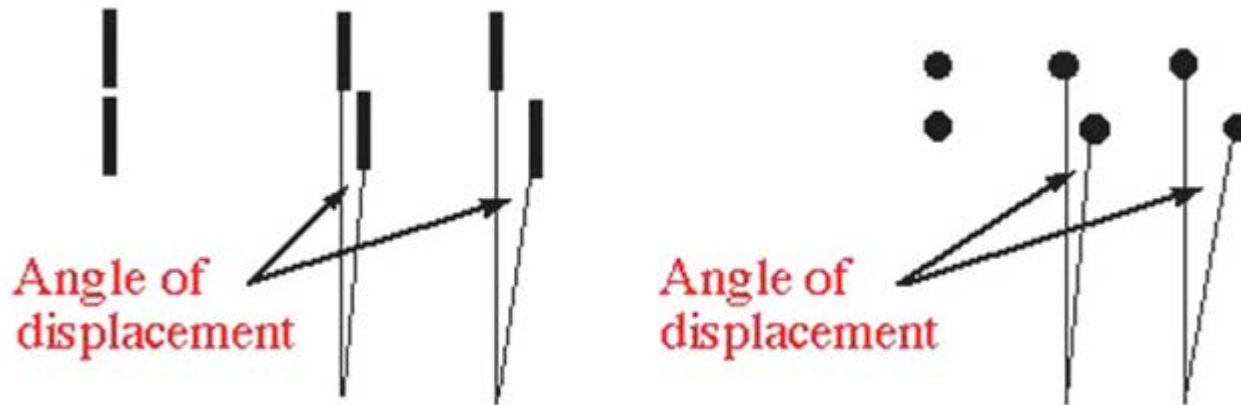


Excelente habilidad para detectar la inclinación.

Mínimo espacial discriminable o hiperagudeza

La desalineación más pequeña que se puede discriminar de manera fiable se conoce como **agudeza a vernier**

Tarea de localización. Ejemplo de agudeza de Vernier



El proceso de hiperagudeza ocurre a **niveles postreceptoriales** que incluyen la retina y las neuronas corticales. Interpolan la información posicional con alta resolución.

Mínimo espacial discriminable o hiperagudeza

CRITERIO	MÍNIMO DISCRIMINABLE (HIPERAGUDEZA)
Tarea	diferenciaciones espaciales cuando el umbral es menor que la AV común. Determinar la ubicación de dos o más aspectos visibles entre estímulos.
Pregunta psicofísica típica de elección forzada	¿La línea superior está a la derecha o al izquierda de la línea inferior?
Base fisiológica	Asignación de signos locales relativos a dos o más aspectos visuales supraumbrales
Métodos de medición	Variar la ubicación relativa de los estímulos
Magnitud del mejor umbral	Aprox 3" de arco
Efecto de la degradación de la imagen	Leve

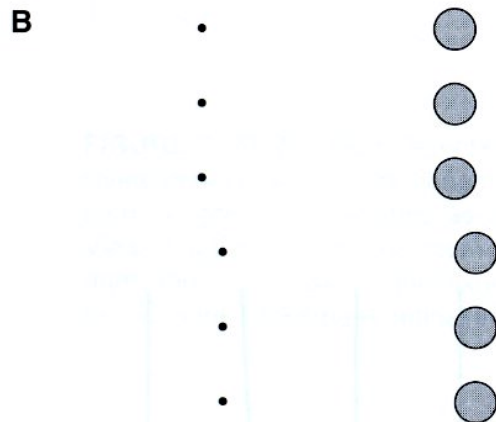
Hiperagudeza

La hiperagudeza es muy resistente al **desenfoque óptico**



AV de resolución

El desenfoque óptico hace que los círculos de difusión se superpongan, lo que interfiere con la resolución de las dos líneas



Hiperagudeza

El desenfoque óptico no interfiere y las posiciones de las dos líneas se pueden determinar

Factores que limitan la resolución espacial

- Factores ópticos
- Factores anatómicos y fisiológicos
- Luminancia and Contraste

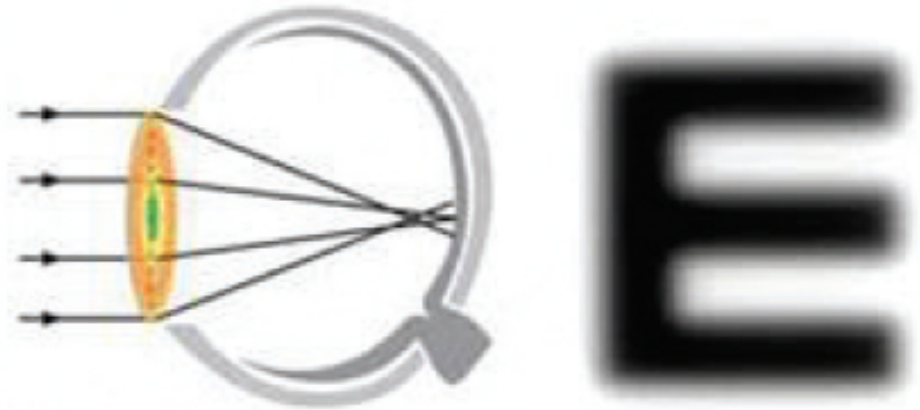
Factores limitantes: sistema óptico ocular

Formación óptica de la imagen retiniana

- La calidad óptica de la imagen retiniana está descrita por la PSF (formación de imagen)
- Los principales factores que afectan a la PSF son:
 - Aberración esférica
 - Aberración cromática
 - Dispersión
 - Difracción
 - El desenfoque producen una pérdida notable de la calidad de imagen

Aberración esférica

Los rayos de luz que entran a través de la **periferia** de la pupila se **refractan más** que los rayos paraxiales (no están enfocados en la retina).



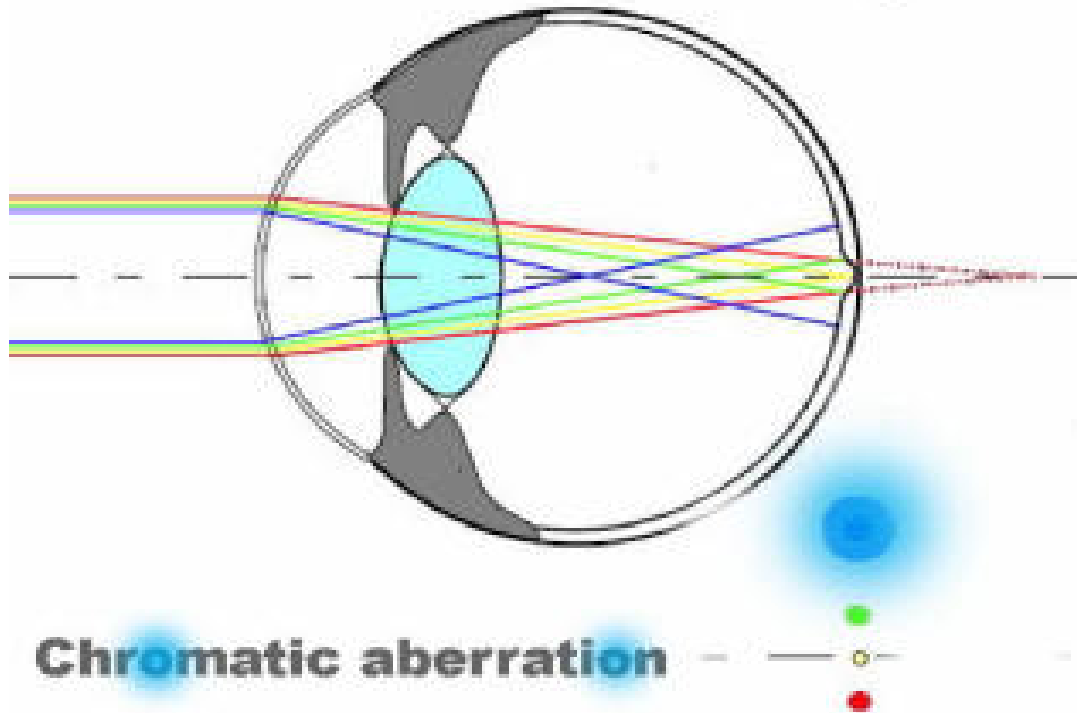
La aberración esférica causa algo de "desenfoque" de la imagen

La aberración esférica en el ojo es solo de aproximadamente 0.50 D para una pupila de 5 mm debido a los mecanismos compensadores:

- Cornea asférica
- Gradiente del índice de refracción del cristalino.
- Efecto Stiles-Crawford

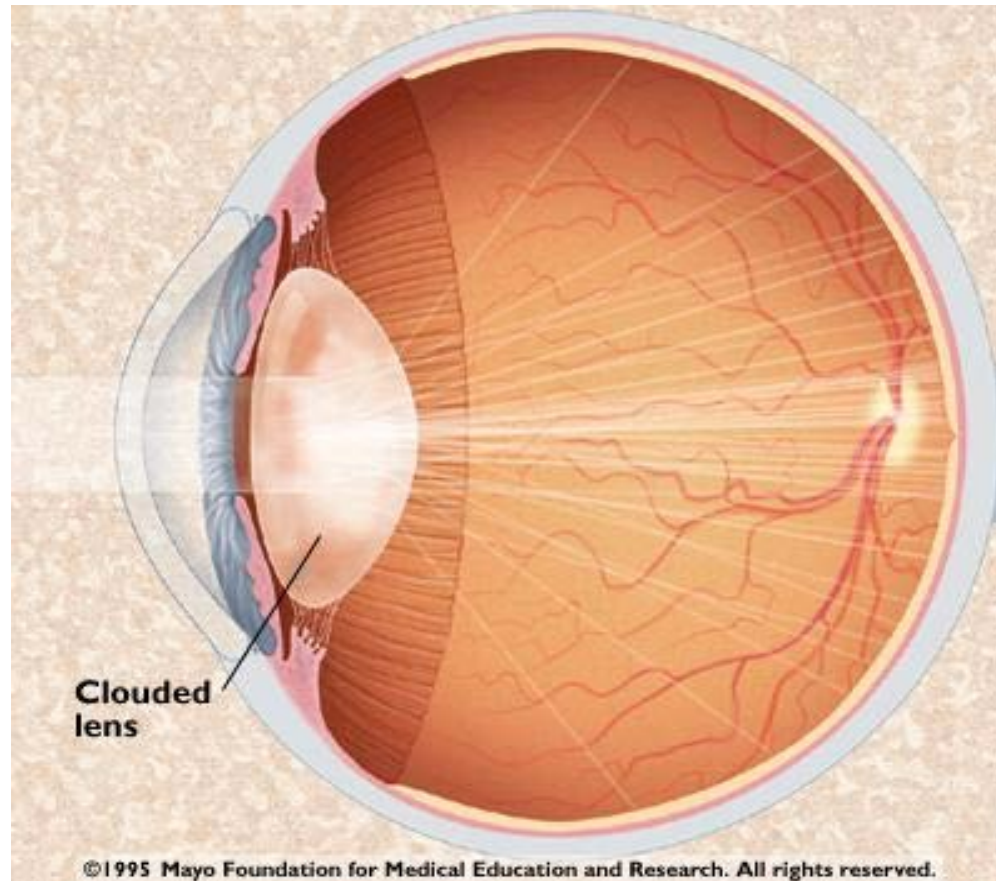
Aberración cromática

Las longitudes de onda cortas focalizan antes que las longitudes de onda más largas



Resultado: franjas de colores alrededor de los objetos.

Dispersión de luz intraocular



Difracción óptica

- La teoría ondulatoria de la luz predice que:
 - Incluso para un sistema óptico “perfecto”, la imagen de un objeto no puede ser un punto, pero se extiende cubriendo un área finita debido a la difracción en los márgenes del sistema óptico
 - Para una fuente de luz puntual y una **apertura circular** (como la pupila) la imagen toma la forma de un **disco central luminoso** rodeado por anillos más tenues

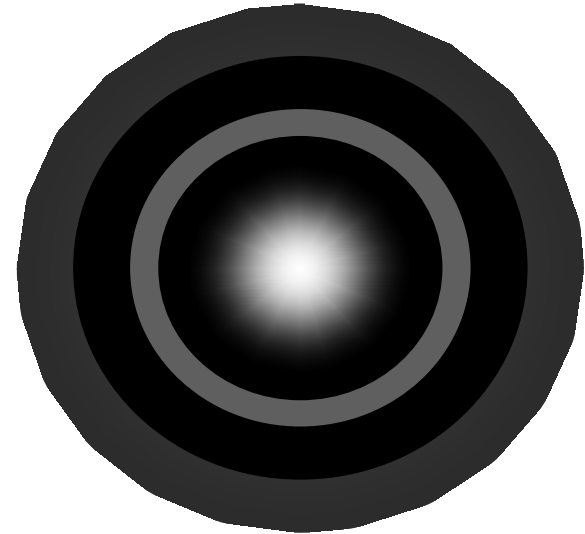
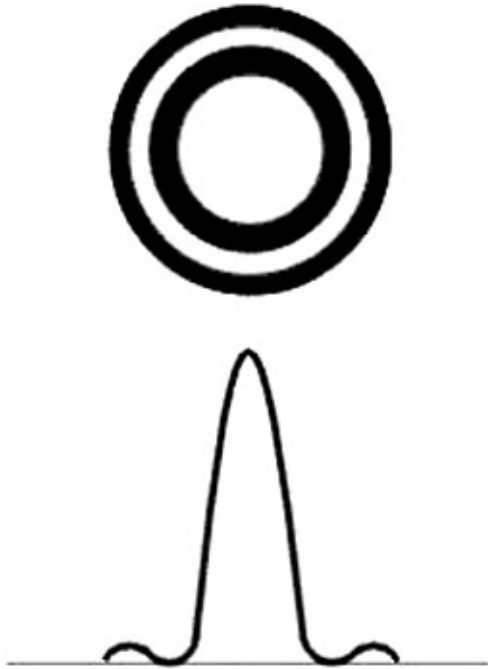


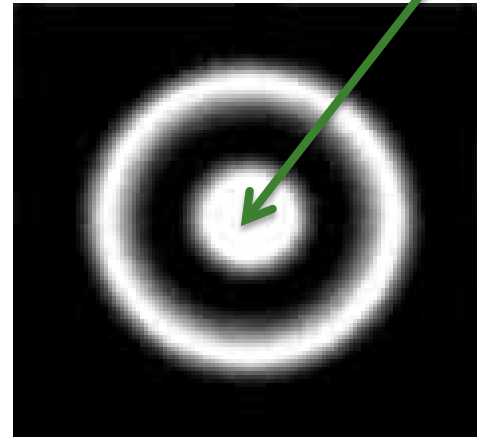
Imagen de un punto

Difracción óptica

El disco de Airy (disco central)
contiene alrededor del 84% de la luz
del patrón de difracción



PSF limitada por la difracción

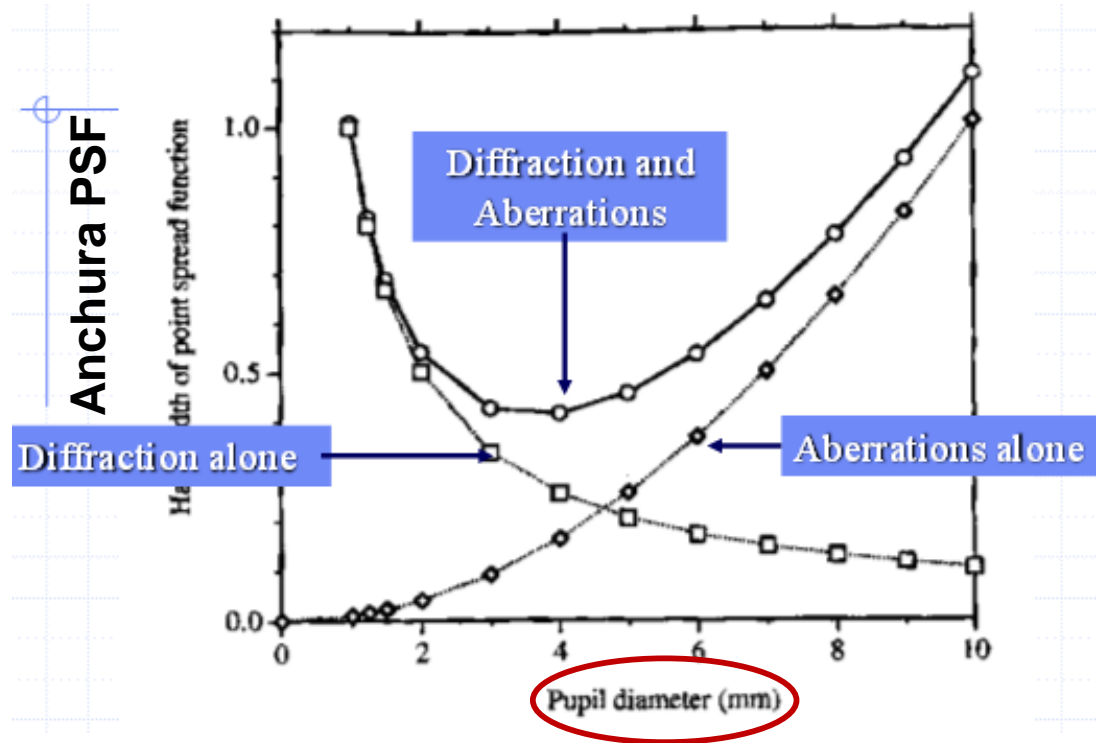


Diámetro del disco de Airy en el ojo:

$$2,44 \cdot \frac{\lambda}{d_p} \text{ rad} \sim 90 \text{ segundos arco}$$

Formación óptica de la imagen

Hay un tamaño de pupila óptimo para diferentes condiciones



Difracción: sí el diámetro pupilar es ≤ 2 mm, la PSF es igual a la imagen de difracción.

Aberraciones: Sí el diámetro de pupila es ≥ 5 mm la PSF ensancha ya que aumenta la contribución de las aberraciones

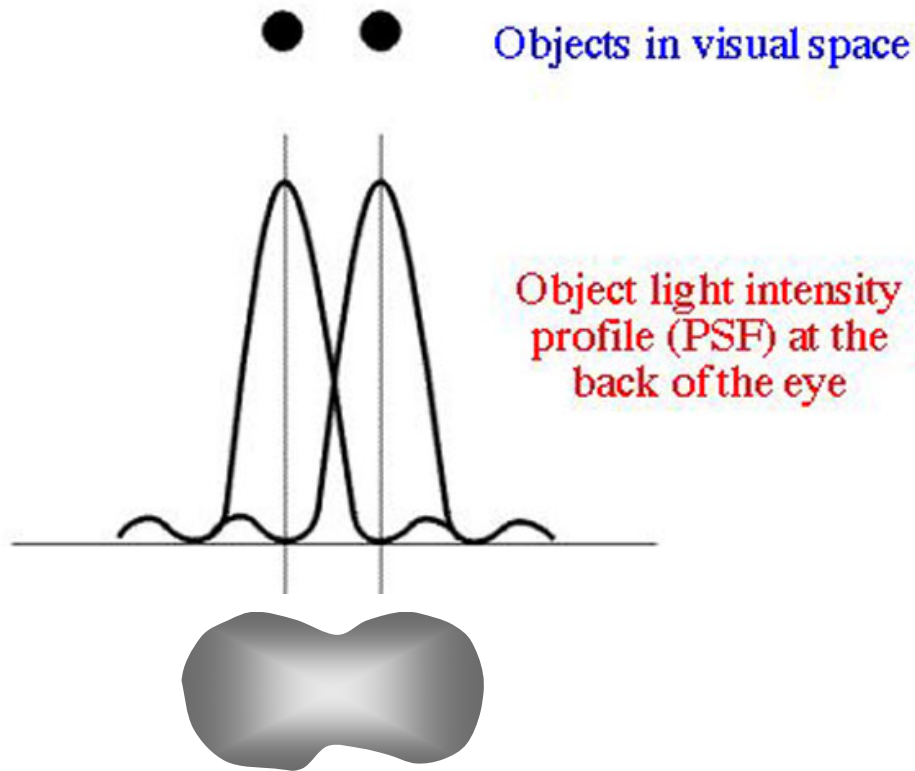
Sistema óptico ocular

¿Qué limita la formación de la imagen óptica en el ojo?

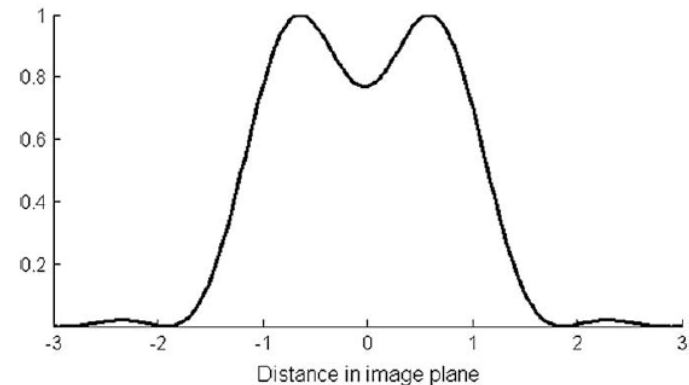
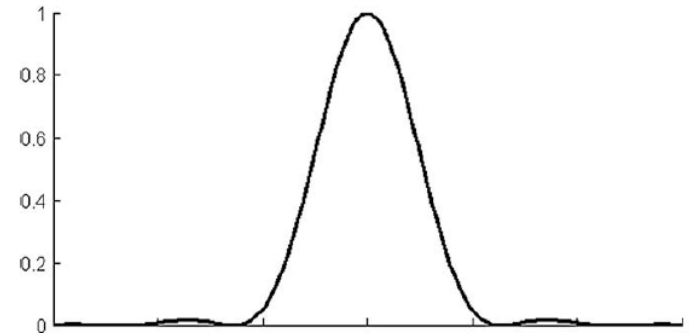
- Si se eliminan todos los factores que afectan a la calidad de la imagen (PSF), el sistema óptico sólo estaría limitado por la **difracción**
- En este caso el **criterio de Rayleigh** proporciona el **ángulo de resolución umbral** para la formación de la imagen

Efecto de la difracción en la resolución

La difracción provoca la propagación de la luz desde las dos fuentes puntuales

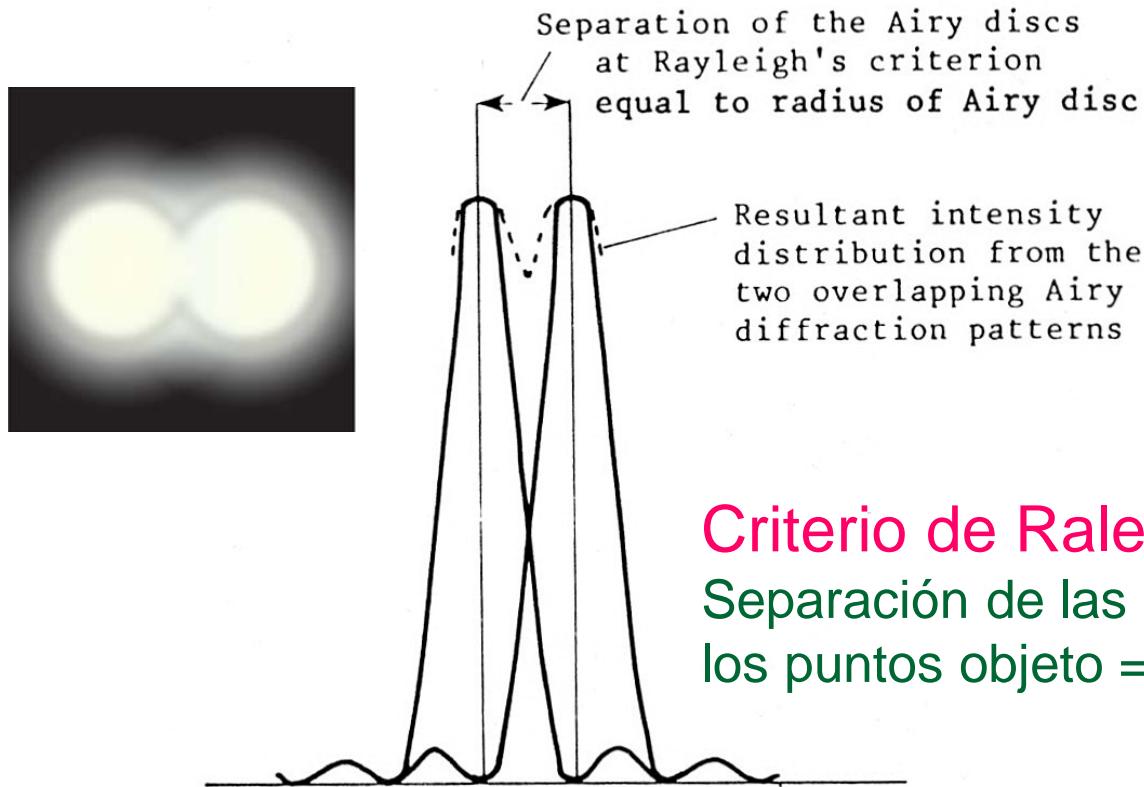


2 puntos resueltos “justo”



Abajo: distribución de luz en la imagen de un par de puntos separados por el **límite de Rayleigh**

Efecto de la difracción en la resolución



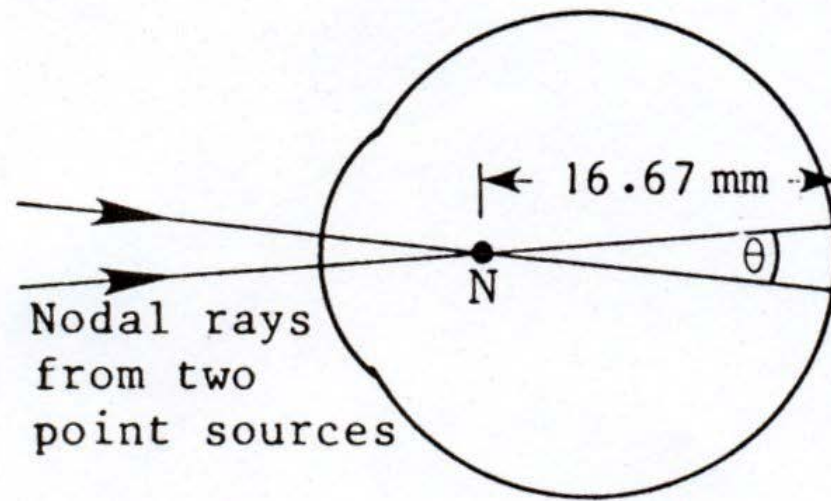
Criterio de Raleigh:

Separación de las imágenes geométricas de los puntos objeto = Radio del disco de Airy

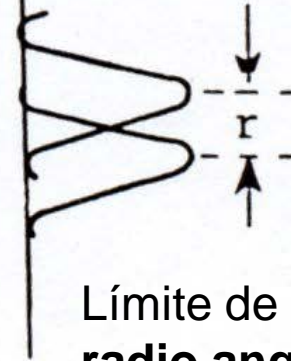
El **criterio de Rayleigh** indica que dos imágenes solo se pueden resolver cuando el centro del patrón de difracción de una (pico del 2º disco de Airy) cae directamente sobre el primer mínimo del patrón de difracción de la otra (1º disco de Airy).

Efecto de la difracción en la resolución

El **Mínimo Ángulo de Resolución** del sistema óptico del ojo es igual al ángulo subtendido en el punto nodal por el radio del disco de Airy



Intensity across
two Airy discs at
Rayleigh's limit



Límite de Rayleigh:
radio angular del disco de Airy

El mínimo ángulo de resolución (MAR) para resolver si dos puntos están separados es:

$$\theta_{\min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d_p} \text{ rad}$$

d = diámetro de la pupila

La difracción limita la resolución del ojo

Radio angular del disco de Airy para
 $\lambda = 555 \text{ nm}$ y diámetro de pupila de 4 mm

$$\text{sen } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} = \frac{1,22 \times 555 \times 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,000169275 \text{ radianes}$$

**La difracción establece el límite de resolución del ojo,
aproximadamente $\theta \approx 35''$**

Radio del disco de Airy (r) en el ojo reducido ($N'F' = 16,67 \text{ mm}$)

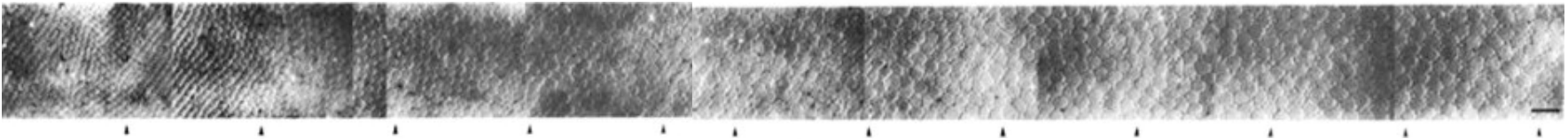
$$r = 16,67 \text{ sen } 35'' = 0,0029 \text{ mm} \approx 3 \mu\text{m}$$

Factores anatómicos y fisiológicos

Resolución espacial alta si:

Densidad de conos alta y poca separación entre los conos foveales

Cuanto más empaquetados estén los conos, mejor se podrá representar la distribución de la luz en el sistema visual.



fovea

periferia

Convergencia celular de conos en ganglionares:

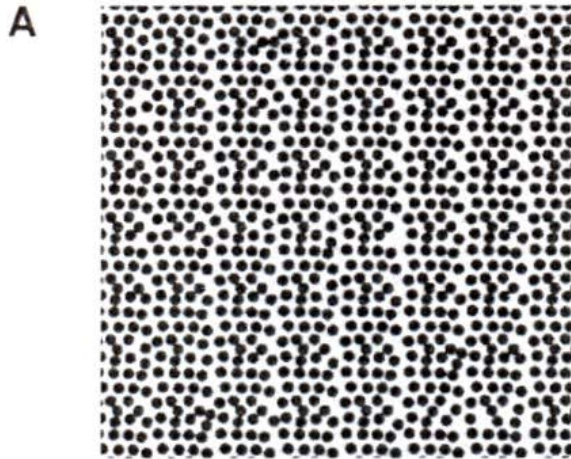
Conducción de la señal individualizada 1 cono - 1 bipolar - 1 ganglionar

Es decir, dos conos adyacentes deben ser capaces de conducir sus impulsos a lo largo de fibras nerviosas separadas

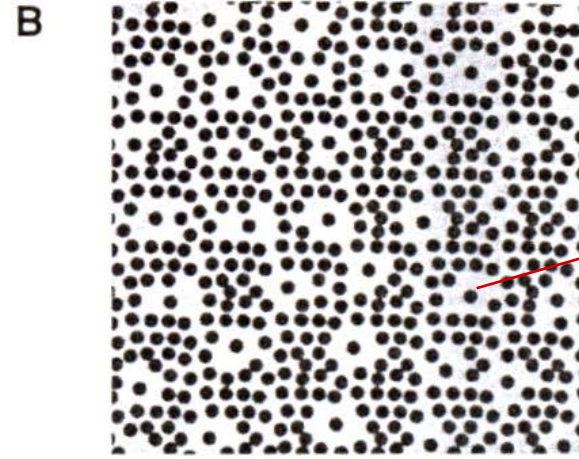
Fovea: 1 cono - 1 célula ganglionar

Periferia: muchos conos - 1 célula ganglionar

Densidad de conos en la retina

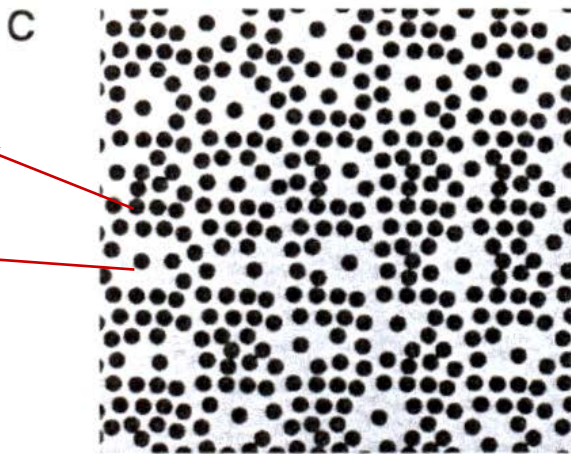


Fóvea central

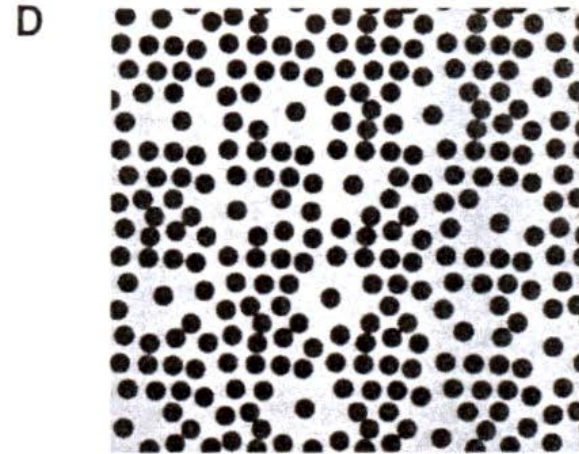


Límites de la fóvea

Cono



Periferia media



Periferia extrema

Bastón



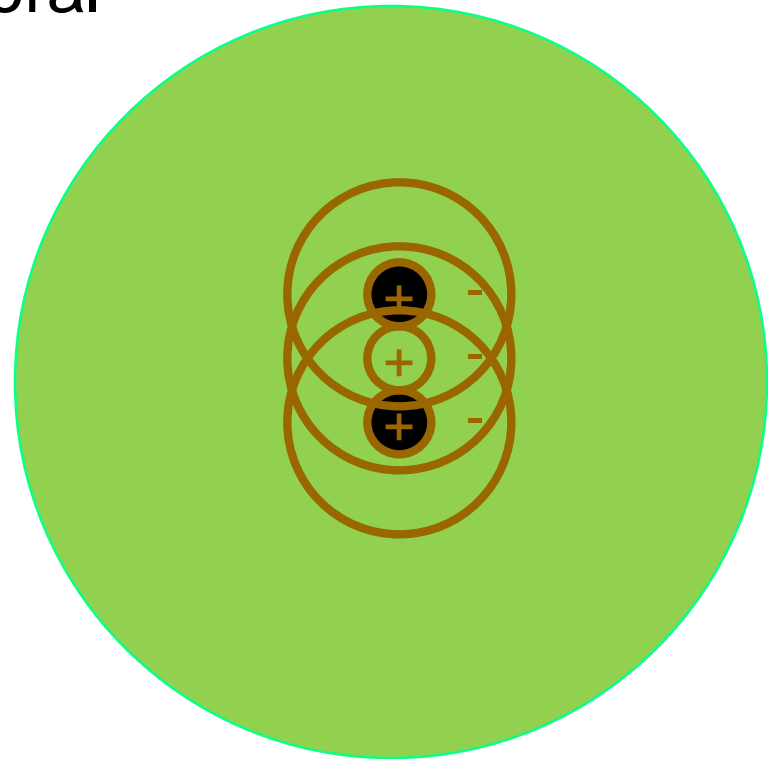
Cono



Factores anatómicos y fisiológicos

Factores neuronales: Sistema detector y procesamiento postreceptoral

En la fóvea, cada cono tiene una "línea privada" hacia la corteza cerebral. Por lo tanto, los centros de los campos receptores de las células ganglionares tienen la anchura de un cono.

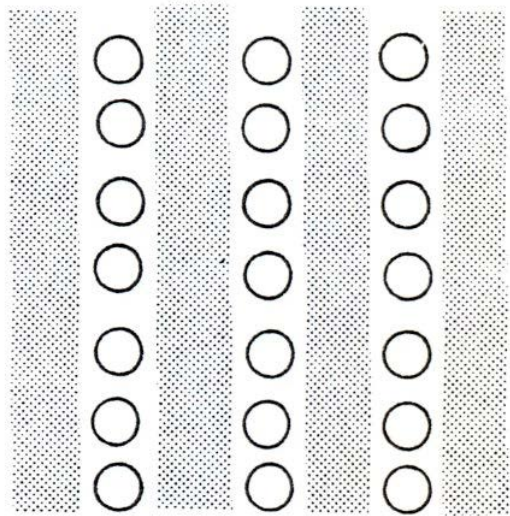


Separación de los campos receptores

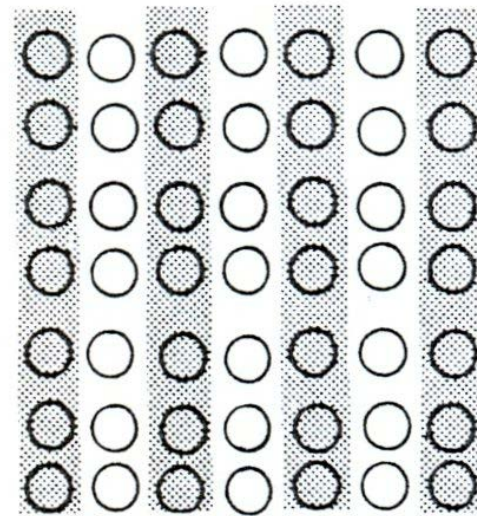
En la fovea = separación entre conos

Sistema detector y procesamiento postreceptoral

Densidad de detectores baja



Densidad de detectores alta



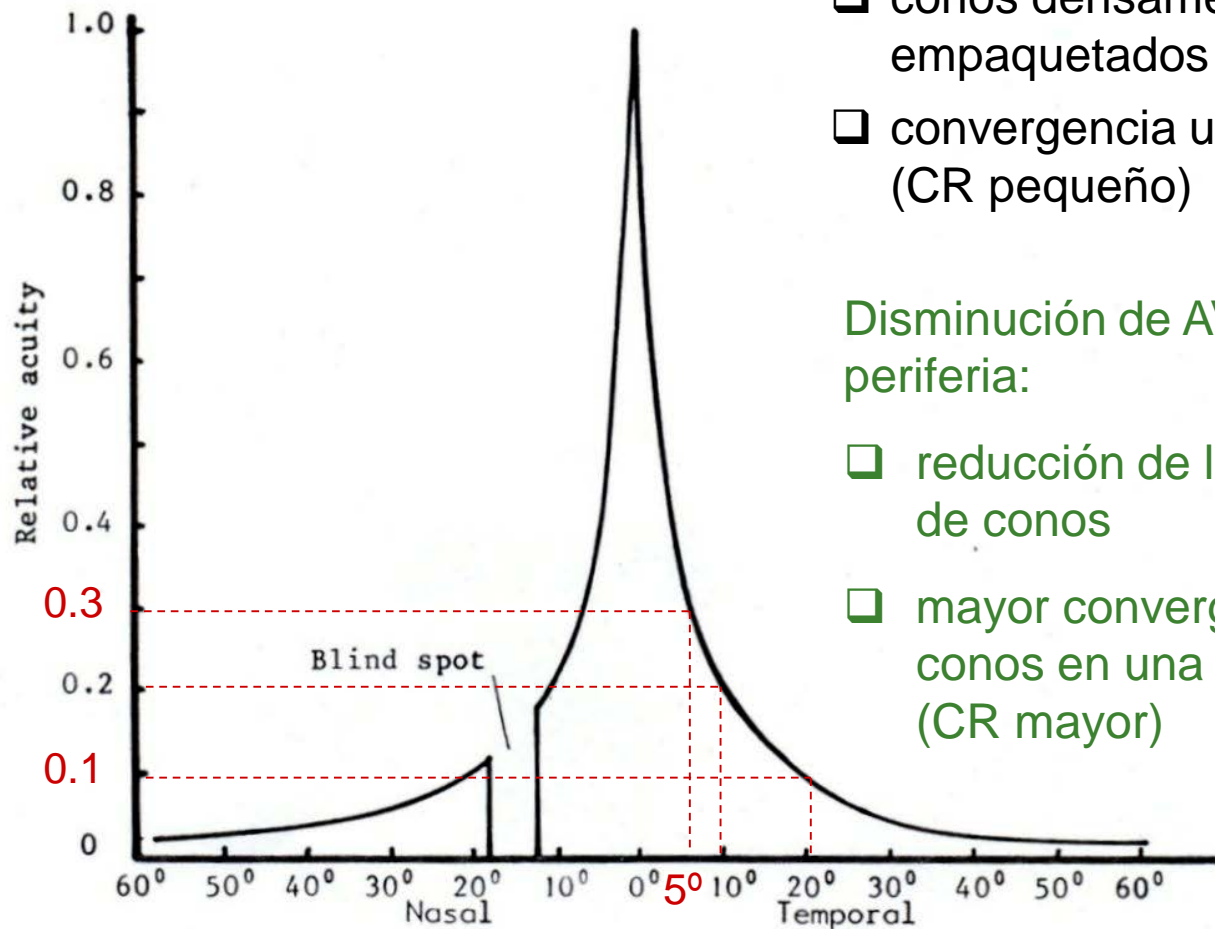
La rejilla se resolvería si hubiera una fila de conos menos estimulados entre filas de conos más estimulados

Si muchos conos convergen en una sola célula ganglionar, la ventaja de tener conos muy próximos se pierde

En visión periférica, la resolución está limitada porque las células ganglionares están muy espaciadas y combinan la información de muchos conos.

Factores anatómicos y fisiológicos

Variación de la AV según área de la retina estimulada



Mayor AV en la fovea:

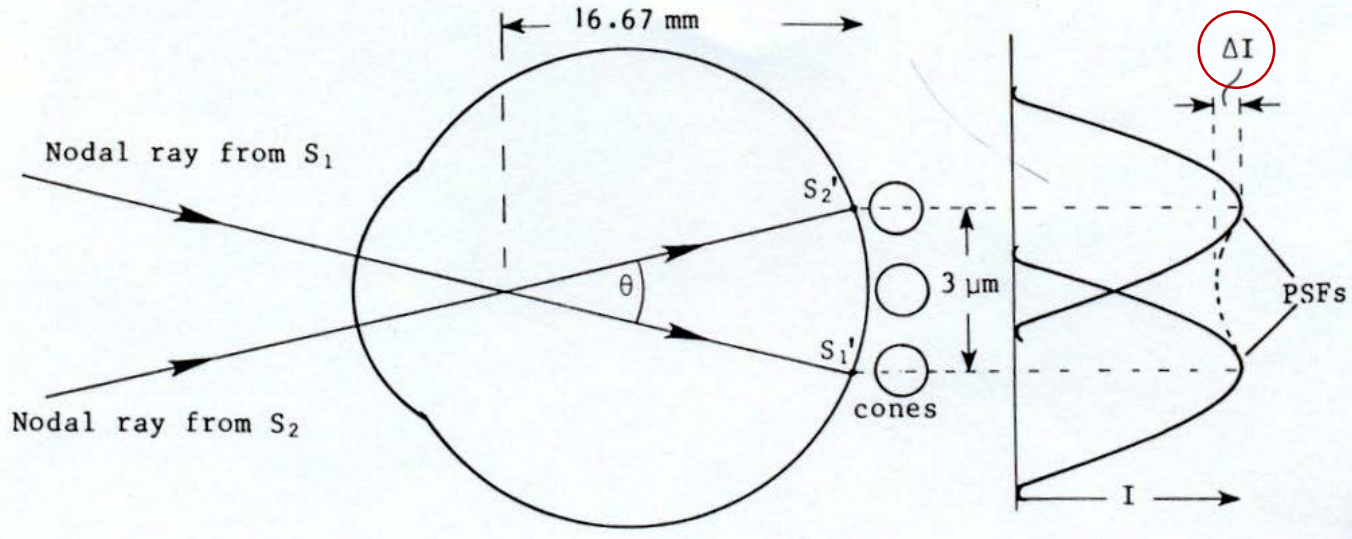
- ❑ conos densamente empaquetados
- ❑ convergencia uno a uno (CR pequeño)

Disminución de AV hacia la periferia:

- ❑ reducción de la densidad de conos
- ❑ mayor convergencia de conos en una ganglionar (CR mayor)

La degradación de la imagen por aberraciones para puntos objeto fuera del eje se detecta menos debido a la reducción de la AV en la periferia

Límite anatómico de resolución espacial



Resolución
espacial:
**tarea de
detección de
contraste**

Criterio de Hartridge: las imágenes de dos objetos puntuales solo podrán ser resueltas por el sistema visual si:

- Se estimulan dos conos con un cono entre ellos menos estimulado,
- Y el contraste alcanza el valor de la fracción de Weber personal del sujeto.

Mínimo ángulo de resolución para dos puntos S_1 y S_2 :

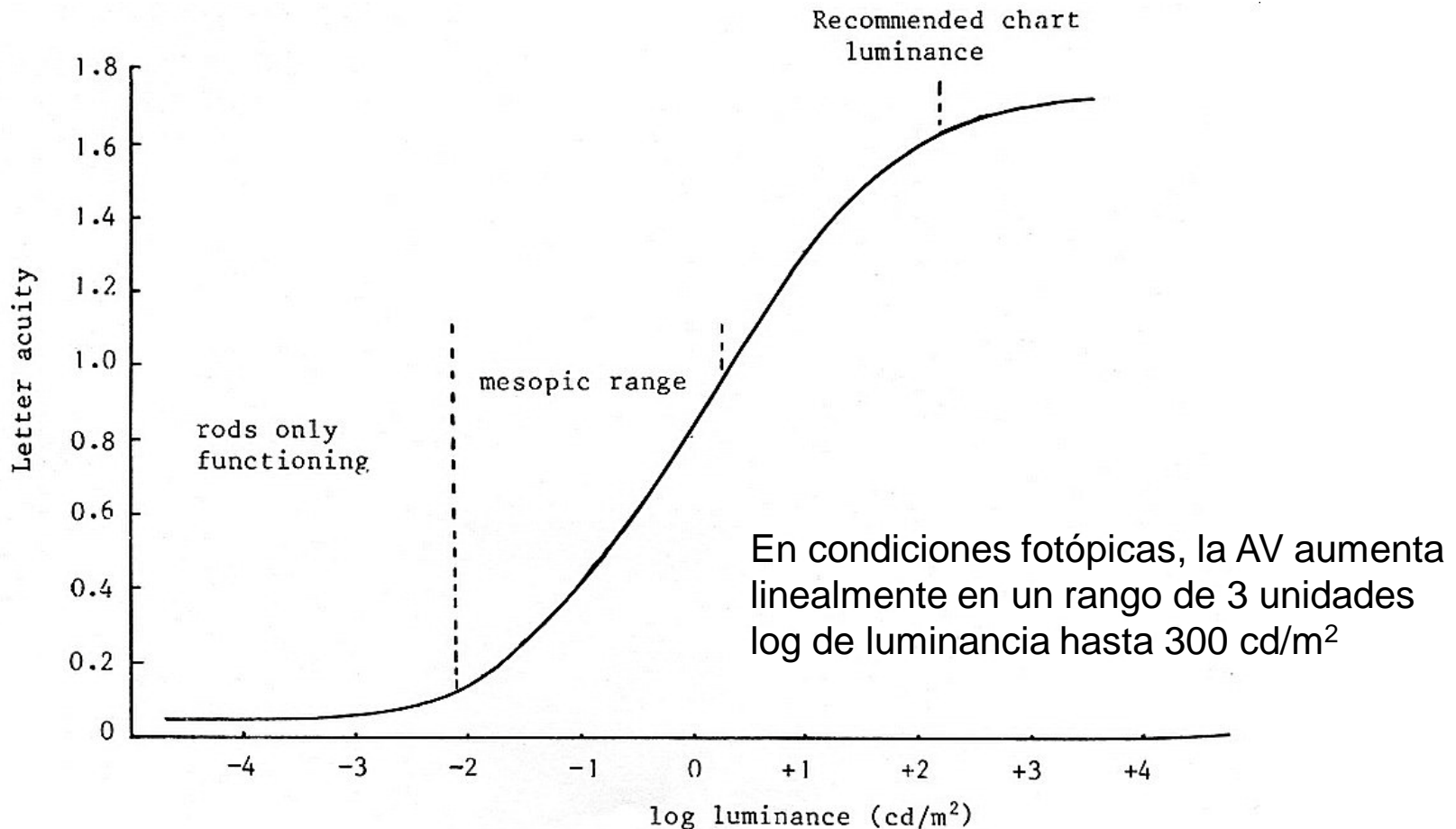
$$\theta = \frac{3 \times 10^{-6}}{16,67 \times 10^{-3}} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ Radianes} = \mathbf{37'' \text{ de arco}}$$

Hay acuerdo entre el límite de AV que establece la difracción y el límite que establece el mosaico de conos foveales

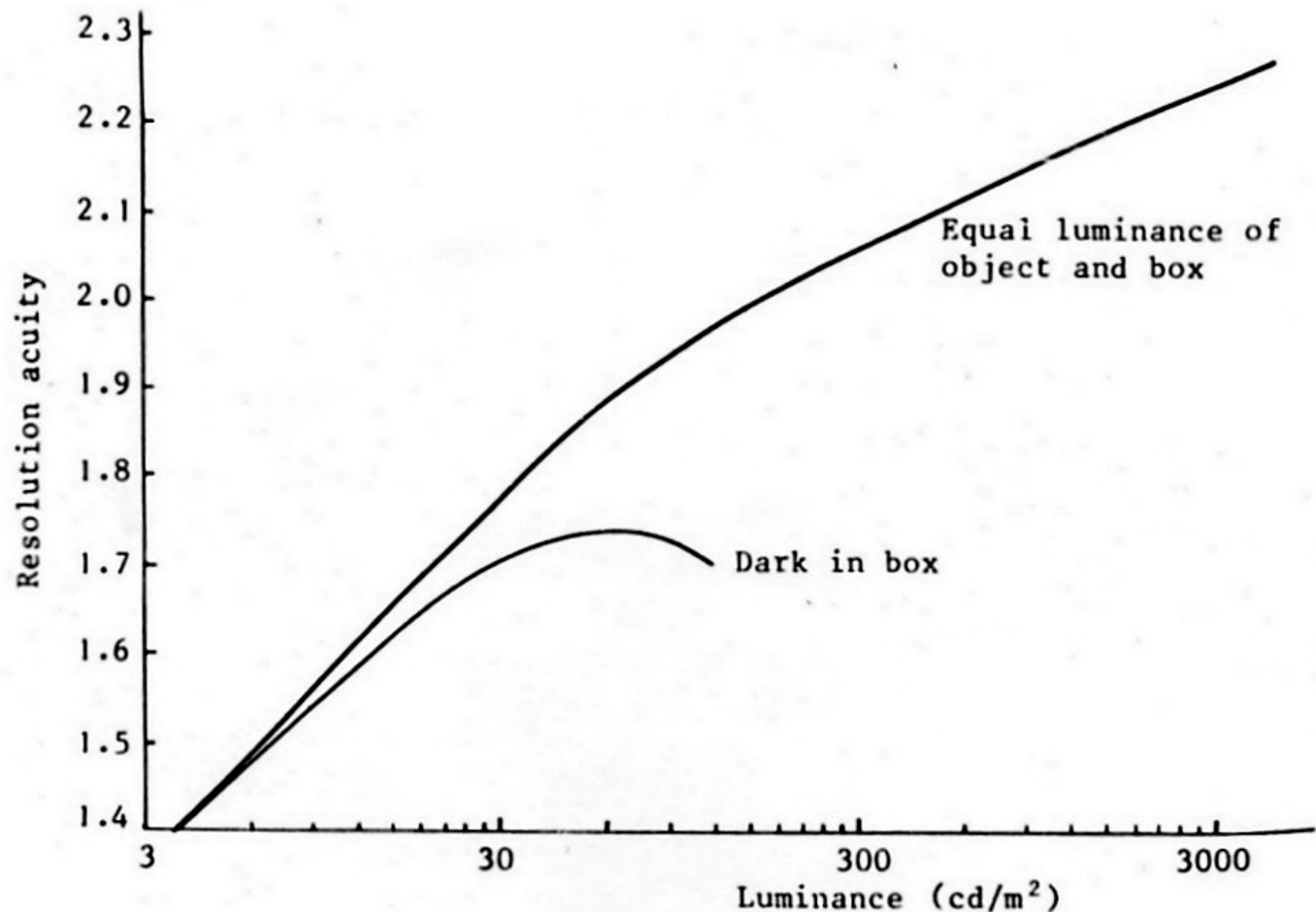
Factores que limitan la resolución espacial:

Luminancia

La agudeza visual varía con el nivel de luminancia de fondo



Factores que limitan la resolución espacial: Luminancia



Factores que limitan la resolución espacial: contraste y color

- La agudeza visual depende fuertemente del contraste: aumenta cuando aumenta el contraste
 - Alrededor de 0,5 decimal para un 10% de contraste
 - Alrededor de 0,33 decimal para un 5% de contraste.
- La agudeza visual es la misma con luz blanca que con luz de cualquier longitud de onda



Gracias